

결정질과 비정질 PV모듈의 자연광 스펙트럼에 따른 Isc의 변화

공지현*, 지양근*, 강기환**, 유권중** 안형근*, 한득영*

*건국대학교 대학원 전기공학과(kkongchi@konkuk.ac.kr),

**한국에너지기술연구원 태양광연구단(ghkang@kier.re.kr),

Transition of Isc according to Natural Solar Spectrum on c-Si and a-Si PV Module

Kong, Ji-Hyun*, Ji, Yang-Geun*, Kang, Gi-Hwan**,
Yu, Gwon-Jong**, Ahn, Hyung-Geun*, Han, Deuk-Young*

*Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University(kkongchi@konkuk.ac.kr),

**Photovoltaic Research Group, Korea Institute of Energy Research(ghkang@kier.re.kr),

Abstract

In this paper, we analyze the Transition of Isc by natural solar spectrum of c-Si and a-Si PV module. Commonly, performance of photovoltaic (PV) module is estimated under the standard test condition (STC). That is, solar irradiance : 1 kW/m^2 , solar spectrum distribution : AM 1.5G, module temperature : $25\text{ }^\circ\text{C}$. This means it rarely meets actual outdoor conditions. The solar spectrum always changes. So it is rare to fit the standard solar spectrum AM1.5G defined in ASTM G173-03 or IEC 60904-3. Thus spectral response of PV module is different depending on the material. so we estimated the variation of Isc at every minutes by comparing c-Si PV module with a-si PV module for outdoor conditions.

Keywords : 태양광 스펙트럼(Solar spectrum), 분광응답(Spectrum response), 스펙트럼 부정합(Spectral mismatch), 태양전지모듈(Photovoltaic module), Air mass(AM)

1. 서 론

PV모듈의 발전 성능에 대한 평가는 국제적으로 규격화된 STC(Standard Test Condition) 조건에 의해 평가되고 있다. STC 조건은 일

사량 : 1 kW/m^2 , 태양광 스펙트럼 분포 : AM 1.5G, 모듈온도 : $25\text{ }^\circ\text{C}$ 을 표준으로 하고 있다. 또한 우선적으로 실내에서 솔라시뮬레이터를 이용하여 제한된 환경 내에서 PV모듈의 발전 성능에 관한 측정이 이루어진다. 그

것은 PV 모듈의 성능이 외기 환경에 의해 많은 영향을 받기 때문이다. 이러한 실내 환경은 실제의 외부 환경과는 상반된 경우가 대부분이다.

최근 PV 모듈의 출력 특성에 영향을 미치는 요소인 스펙트럼변화에 따른 특성 연구가 진행되어 오고 있다. PV 모듈의 출력은 태양광의 파장에 의해 일사강도가 정해진다. 하지만 흡수되는 영역의 파장의 넓이를 일사강도로 정의하기 때문에 이를 이용해 출력을 결정짓는 기존 태양전지의 이론적으로는 각 파장분포에 따른 출력 변화를 예측하기 힘든 부분이 있다. 실제 자연광에서는 스펙트럼의 변화와 일사량의 변화가 동시에 일어난다. 이로 인해 시간대별로 일사량과 스펙트럼의 불일치(Spectral mismatch)가 일어날 것으로 예상할 수 있다.

PV모듈의 구성 재료(c-Si, a-Si)에 따라 빛을 흡수하는 영역대인 분광응답(Spectrum response) 곡선이 다르게 그려지는데 그림 1에서와 같이 결정질(c-Si) 태양전지의 경우 350-1150nm의 영역에서 넓게 분포한다. 반면에 비정질(a-Si) 태양전지는 이보다 좁은 영역에서 분광응답 특성을 나타낸다.

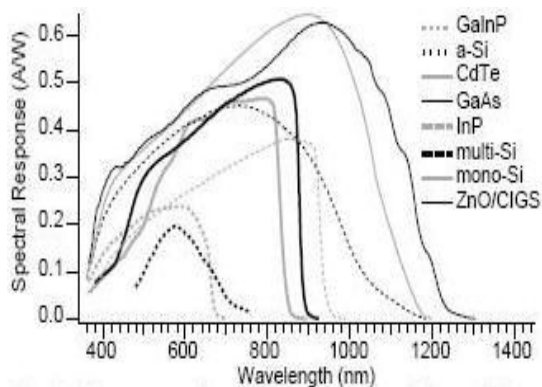


그림 1. 재료별 분광응답 특성

2. 태양광 스펙트럼

지표상에 달하는 태양에너지는 우주라고

하는 거의 진공인 장소를 거쳐 전자파의 형태로 전달된다. 이는 평균 1억 5,000만 km라는 지구와 태양간의 거리를 생각하면 지구 표면에서는 거의 평행 직선 광선으로, 전자기학적으로 평면파의 집합으로 고려한다. 에너지 스펙트럼은 넓은 파장 대역을 갖지만, 대기 중에 들어와 X-선에서 우주선까지의 높은 에너지 입자는 산란에 의해 감소되므로, 지표에 달하는 직사 일광은 약 5,700K의 흑체복사의 에너지 스펙트럼에 거의 일치하는 연속 스펙트럼 분포를 가지고 있다.

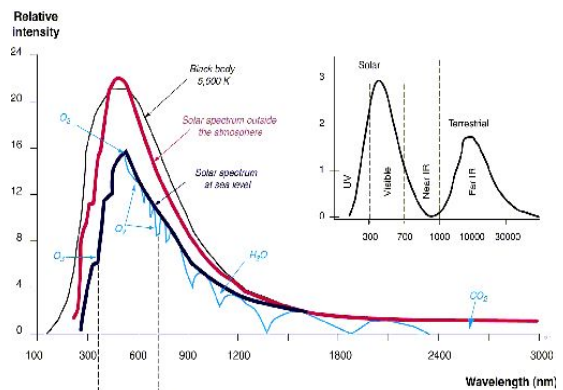


그림 2. 태양에너지 스펙트럼 분포밀도

태양정수는 지구가 태양에서 평균거리 1.495×10^8 km일 때, 지구 대기의 흡수 및 산란이 없다고 보고, 태양 복사의 입사 방향에 수직으로 둔 1 cm^2 의 평면에 1분간 입사하는 태양 방사에너지의 양으로 정의 한다. 태양정수는 미국 항공우주국(NASA)이 최근 인공위성을 사용하여 실제 측정 한 값이 표준치로 사용되며, 그 값은 $1,981 \text{ y/min} = 138 \text{ mWcm}^{-2} = 1.38 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 128 \text{ Wft}^{-2}$ 이다. 여기서 $1 \text{ y} = \text{cal/cm}^2$ 이다. 대기외의 태양 방사는 X선(파장 $\lambda < 10 \text{ \AA}$), 극단 자외선($10 \text{ \AA} \sim 2,000 \text{ \AA}$), 중간 자외선($2,000 \text{ \AA} \sim 3,150 \text{ \AA}$)까지의 짧은 파장의 광을 포함하고 있으나, 이 광은 초고층의 대기 중의 분자와 오존으로 산란 및 흡수를 하기 때문에 지표에 도달하는 최단파장은 $3,000 \text{ \AA}$ 이 된다. 따라서 지표의 일사에

너지 밀도는 약 $86 \sim 100 \text{mW/cm}^2$ 정도이다. 실제로 지구 표면에 입사하는 일사량은 대기를 통하여 여러 가지 감쇄를 받는다. 대류권을 통과하는 일사에 현저한 흡수 효과를 나타내는 것이 수증기와 오존이다. 수증기의 흡수는 일사의 장파장 측, 즉 근적외선에 집중되어 있고 비교적 좁은 파장 영역에서 강한 흡수를 나타내는 6개의 흡수대로 나누어져 있다. 각각의 흡수의 강도는 파장 대에 따라 다르나, 실제의 흡수량은 대기 중에 포함되는 수증기에 의해 결정된다. 오존의 흡수는 수증기와는 반대로 적외선 영역에 대단히 강한 흡수대를 갖고, 가시광선 영역에 역한 흡수대를 갖는다. 오존은 대기 중의 고고 약 20km 부근에서 농도가 최대로 소위 오존층을 형성하고, 이 층에서 $3,000 \text{\AA}$ 부근의 자외선이 흡수되므로, 지표면에 도달하는 태양광은 그림 2의 검은 선으로 나타낸 바와 같고, 이와 같은 대기에 의한 흡수를 나타내는 것이 그림 2와 같은 스펙트럼 분포이다.

실제로 대기 중에는 공기 분자 외에 에어로졸이라는 입자상 물질이 포함되어 산란을 받게 된다. 따라서 대기를 통과하여 지상에 도달하는 직접 일사량 $I(\lambda)$ 는

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-(\tau_R + \tau_N + \tau_W \cdot \omega) \sec Z_0] \quad (1)$$

와 같이 나타낸다.

여기서 Z_0 는 태양천정각, ω 는 강수량이다. τ_R 은 공기 분자에 의한 산란 감쇄계이며, $\tau_R(\lambda) = 0.00386\lambda^{-4.05}$ 이다. 또 $\tau_W(\lambda)$ 는 수증기에 의한 흡수의 감쇄계수로, 이때의 강수량 ω 를 알면 그 흡수량을 구할 수 있다. 태양광선이 지구표면에 도달할 때, 대기는 태양광선을 산란시킨다. 주로 적외선 영역은 수분-수증기 흡수가 일어나고, 자외선 영역에서는 오존흡수가 발생하며, 공기 중의 먼지와 에어로졸에 의해 산란된다.

대기가 태양광선을 받아 지구 표면에 미치는 정도를 AM(air mass)이라 정의한다. 태

양과 천정각 분할선으로 AM($AM = 1/\cos \theta$)을 정의하며, 태양광이 직사광선으로 가해질 때, 최소 경로 길이(h)에 상대적인 대기 경로 길이(s)를 측정한다($AM = (1+(s/h)^2)^{1/2}$). 대기외부에 대한 태양 스펙트럼을 나타내는 조건을 AM0조건이라 한다. AM0 스펙트럼은 5800K 흑체에 근사한 스펙트럼을 가진다. AM0 스펙트럼 상태는 인공위성 또는 우주 비행체가 노출되는 환경조건이다. AM1 스펙트럼은 태양이 천정에 있을 때의 태양광선을 나타내는 것이며, 강도는 약 92.5mW/cm^2 이다. 태양광의 투사각 $\theta = 60^\circ$ 에서 AM2 스펙트럼은 약 69.1mW/cm^2 의 투과력을 갖고 있다. AM1.5 조건(수평선에서 45° 에서 태양투사)은 지구상 적용 조건에 가장 근접한 에너지 누적 평균을 나타낸다. 파장을 양자 에너지로 변환하기 위해 다음과 같은 관계를 이용한다.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1.24}{h\nu(eV)} \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$

AM1.5에서의 강도는 83.2mW/cm^2 이다. 이러한 범위를 이용해서 인공위성으로 AM에 대한 범위를 조사하여 그러한 분포도를 제작할 수 있다. 실제 태양전지를 개발할 때에는 지상 조건의 누적 평균 일조량에 적합한 AM1.5G를 가장 많이 사용하며, 세기는 100mW/cm^2 이다.

3. 실험

3.1 실험 방법

시간에 따른 태양광 스펙트럼 및 모듈의 전기적 특성을 알아보기 위하여 그림 3과 같이 측정 장비들을 정남향으로 위치하여 설치하였다. 각각의 모듈은 다결정 결정질(mc-Si) 모듈과 비정질(a-Si) 모듈을 설치하여 같은 각도로 일사량계(Pyranometer)와 태양광 스펙트럼을 측정할 수 있는 분광방사계(Spectroradiometer)를 각각 설치하였다. 또한 모

둘의 전기적 특성을 측정하기 위해 I-V curve tracer를 각 모듈마다 연결하여 모니터링 하였다. 측정 장비의 구성은 그림 4와 같다.

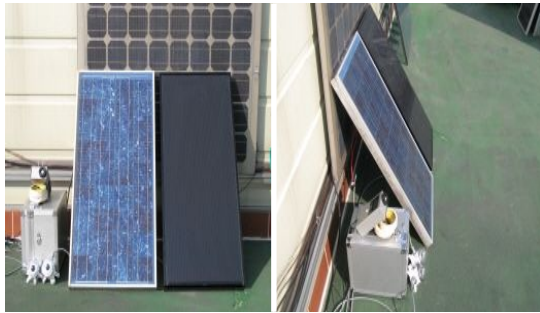


그림 3. 설치된 각 모듈과 장비

모니터링의 시간 간격은 모두 1분 간격으로 측정하였으며 일사량이 좋은 정오 이후의 스펙트럼을 측정하였다. 경사각은 국내 모듈 설치 환경에서 가장 많이 반영되는 30~40° 사이인 35°로 정하였다. 시험에 사용된 모듈의 전기적 사양은 표 1에 나타낸 바와 같다.

표 1. 실험 모듈의 전기적 사양

	c-Si PV module	a-Si PV module
Pmax(W)	50	36.5
Voc(V)	21	65
Isc(A)	3.23	0.866
Vmp(V)	16.8	48.6
Imp(A)	2.97	0.751

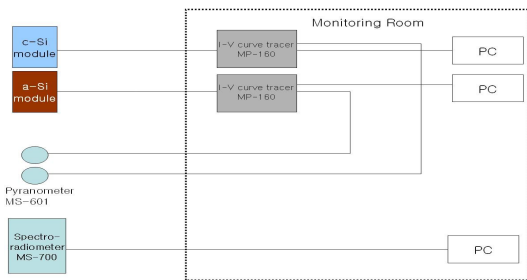


그림 4. 측정 장비

그림 5에서와 같이 실제 측정된 임의의 시간의 스펙트럼은 표준 스펙트럼 분포와 일치

하지 않는다.

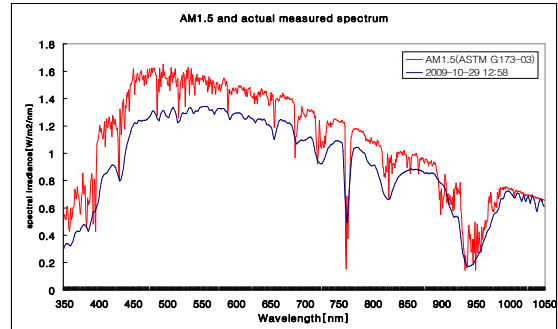


그림 5. 실제 측정된 솔라 스펙트럼과 AM1.5와의 비교

이것은 서두에서 밝힌 바와 같이 대기 중의 수증기 및 에어로졸, 오존에 의한 흡수와 산란으로 인해 지표면에 도달하는 스펙트럼 분포는 위와 같이 차이를 나타낸다.

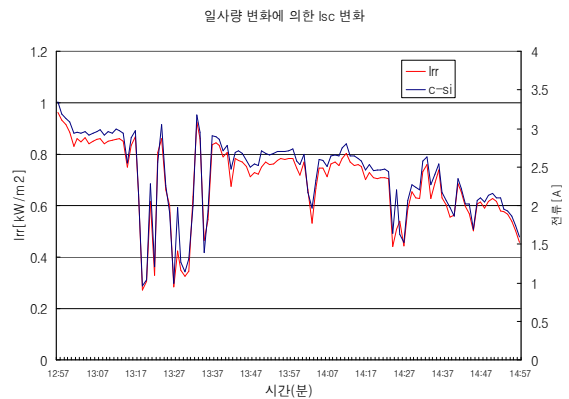
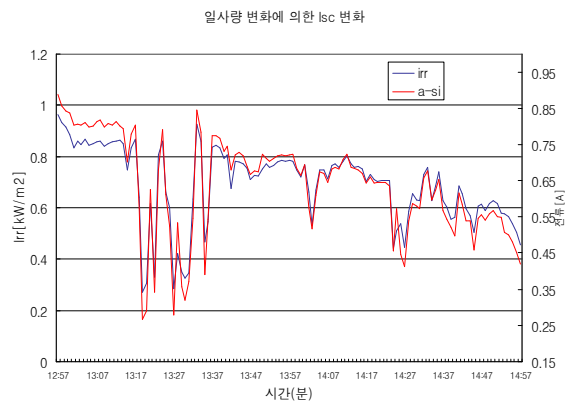


그림 6. 일사량에 의한 Isc의 변화

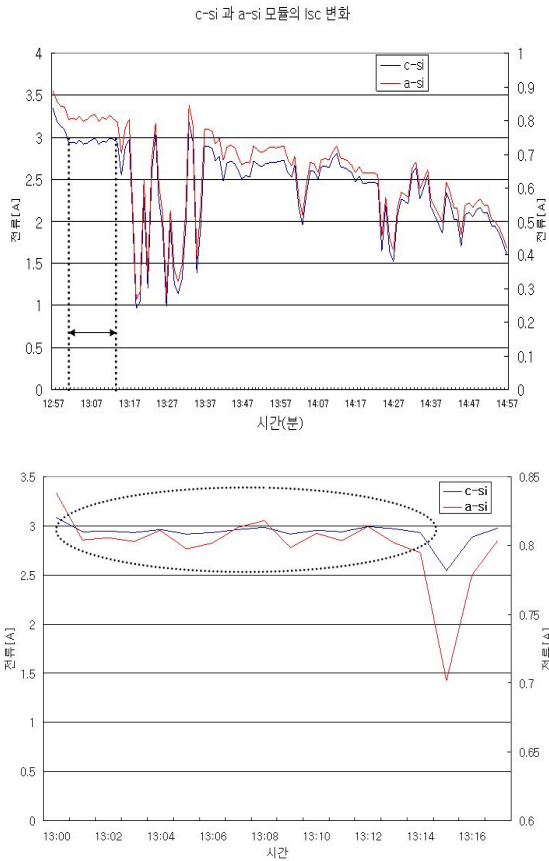


그림 7. c-Si 과 a-Si 모듈의 Isc 변화

그림 6과 7은 모니터링한 Isc값의 변화를 각각 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 일사량이 변화하는 부분에 의해 대부분의 시간대에서 결정질 모듈 및 비정질 모듈의 Isc의 변화는 비슷하게 변화하는 추이를 나타내었다. 특히 일사량이 급격하게 변하는 부분에서도 결정질과 비정질 모듈 모두 비슷한 추이로 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8에서 일사량이 비슷한 같은 시간 동안에 스펙트럼의 변화의 추이를 나타내었다. 시간에 따라 일사량이 변화하면서 전체적인 스펙트럼의 크기는 변화 하였으나 각 파장별 스펙트럼 분포는 큰 변동 없이 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 이는 맑은 날 대기 중에 수증기나 연무의 양이 크게 변하지 않

음에 따라 파장별 스펙트럼이 지표에 도달하는데 있어 흡수나 산란과 같은 요인이 작용하지 않아 측정되는 스펙트럼 분포도의 변화가 일어나지 않음으로 유추할 수 있다.

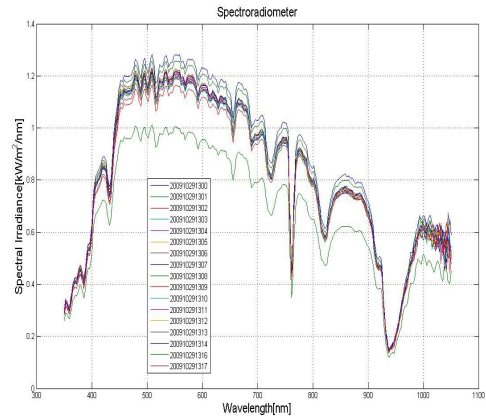


그림 8. 13:00에서 13:17분까지의 스펙트럼 변화

표 2. 13:00에서 13:17분까지의 일사량 및 전기적 출력의 변화

시간	Irr(kW/m ²)	c-Si PV module		a-Si PV module	
		P _{max} (W)	Isc(A)	P _{max} (W)	Isc(A)
13:00	0.946	42.00908	3.084859	33.01721	0.838356
13:01	0.892	39.63991	2.940688	31.28535	0.804034
13:02	0.914	39.45606	2.945599	31.13973	0.8054
13:03	0.908	39.11808	2.933835	30.97495	0.803091
13:04	0.916	39.27384	2.95851	31.17941	0.810919
13:05	0.908	38.53614	2.915	30.60202	0.797456
13:06	0.917	38.72897	2.934113	30.76145	0.801573
13:07	0.918	39.07871	2.965535	31.08758	0.813387
13:08	0.932	39.10592	2.9818	31.16165	0.818164
13:09	0.904	38.15395	2.917727	30.3059	0.798481
13:10	0.915	38.37941	2.956264	30.54551	0.8089
13:11	0.923	38.51898	2.940789	30.46081	0.803418
13:12	0.919	39.19357	2.989884	30.91315	0.813877
13:13	0.929	39.1689	2.972958	30.56536	0.801613
13:14	0.910	38.6354	2.934723	30.29167	0.794661
13:15	0.812	32.62137	2.548241	25.36605	0.701791
13:16	0.900	37.86965	2.883695	29.60486	0.778613
13:17	0.933	38.90635	2.974913	30.54708	0.803913

5. 결 론

이번 실험에서는 구성 재료별 태양전지 모듈에서의 자연광 스펙트럼의 변화와 그에 따른 단락전류의 관계를 분석코자 하였다. 일반적으로 단락전류는 온도함수를 제외하고 일사량이 가장 많은 영향을 받는다. 하지만 시간대별로 일사량이 변화하고 스펙트럼의 분포도 변화한다.

태양전지 모듈의 성능에 대한 평가는 STC 조건에서 평가되고 입사되는 광원에 대한 규격 또한 정의 되어있다. 그리고 옥외에서 태양전지 모듈이 운전되는 경우 규격에서 정의된 스펙트럼 분포와 다른 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 특정 시간대의 일사량의 변화량과 스펙트럼의 분포의 불일치를 알아보기 위해 모듈의 단락전류를 매분단위로 모니터링하였다. 또한 태양전지모듈의 구성 재료에 따라 분광응답 특성이 다르기 때문에 재료가 다른 두 종류의 모듈로 동일한 환경에서 변화를 살펴보았다. 시간에 따라 일사량이 변화하는 추이에 단락전류는 불일치 없이 변화하였고 비슷한 일사량에서의 스펙트럼의 분포 또한 일사량의 크기에 의한 변화 외에는 각 파장대별로 비슷한 분포를 나타내었다.

일사량이 좋은 맑은 날의 스펙트럼의 분포는 일사량의 크기의 변화에 따라 스펙트럼의 크기도 같이 변화하지만 스펙트럼의 분포 특성은 크게 영향을 받지 않는 것으로 본 실험에서 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술 개발사업의 일환(2007-N-PV12-P-01)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이재형, 임동건, 이준진, 태양전지 원론, 홍릉과학출판사, 2005.
2. 이준신, 김경해, 태양전지공학, 도서출판 그린, 2007.
3. S R Wenham, M A Green, M E Watt and R Corkish, applied PHOTO- VOLTAICS, EARTHSCAN, 2007.
4. Jun.Tsutsui, Kosuke. Kurokawa, Investigation to Estimate the Short Circuit Current by Applying the Solar Spectrum, PROGRESS IN PHOTHO -VOLTAICS:RESEARCH AND APPLI -CATIONS, prog. Photovolt: Res.Appl. 2008; 16:205-211
5. Minemoto T, Nagae S, Takakura H, Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photo- voltaic modules, Solar Energy Materials and Solar Cells;91: 919-923
6. King D, Kratochvil J, Boyson W, Measuring solar spectral and angle-of-incidence Effects on Photovoltaic modules and solar irradiance sensors, Proceeding of the 26rd IEEE-PVSC, Anaheim, 1997; 1113-1116
7. Takashi M, Yasuhito N, Hiroaki T, Hideyuki T, Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules, Solar Energy 2009;83;1294-1299
8. Marion B, A method for modeling the current-voltage curve of a PV module for outdoor conditions, Progress in Photovoltaic: Research and Applications 2002; 10: 205-214